Studien

über die

Festigkeit von Dielektrika.

Von

Dr. Konrad Kasperowicz.

Digitized by the Internet Archive
in 2026

https://archive.org/details/IA41545323_0047

Studien

über die

Festigkeit von Dielektrika.

Inaugural-Dissertation,

der

mathematisch-naturwissenschaftlichen Fakultät

der

Universität Freiburg in der Schweiz

zur

Erlangung der Doktorwürde

vorgelegt von

Konrad Kasperowicz

Freiburg (Schweiz)

St.-Paulus-Druckerei.

1904

Drogiej Matce

pracę tę poswięcam.

EINLEITUNG.

Aus allen bisherigen Untersuchungen über die Festigkeit von Dielektrika kann man nur die eine positive Folgerung ziehen, daß nämlich die dielektrische Bruchfestigkeit langsamer als die Isolationsdicke wächst. C. Baur [1] versucht sogar ein allgemeines Gesetz über die Durchbruchsfestigkeit verschiedener Dielektrika aufzustellen :

$$V = c.d^{2/3}.$$

Wo V die Durchschlagsspannung in Volt bezeichnet, d die Plattendicke in Millimetern und C eine konstante ist, die für jedes Material einen bestimmten Wert hat.

Zu der Ausführung der im Folgenden wiedergegebenen Untersuchung veranlaßten mich einige Beobachtungen, welche Herr J. Mościcki bei der Ausarbeitung eines für den praktischen Gebrauch in der Wechselstromtechnik bestimmten Kondensatorensystems gemacht hat.

Bei seinen Bestimmungen der Festigkeit von Dielectrika unterzog er der Durchschlagsprobe auch Glasscheiben. Ungefähr 0,2 cm. dicke Scheiben von

[1] « Electrician », 6. September 1901.

gewöhnlichem Fensterglas waren beiderseitig mit Stanniolbelegungen versehen, welche jedoch überall 5 cm. vom Rande der Glasscheiben entfernt gehalten waren.

Bei den Durchbruchsproben waren die Scheiben vollständig in Öl untergetaucht, welches speziell für Hochspannungsisolation bestimmt war.

Das auffälligste Ergebnis dieser Versuche war, daß sämtliche Probescheiben am Rande der Belegung durchbrochen wurden, obwohl die Messungen zeigten, daß viele der durchbrochenen Scheiben im Innern der belegten Flächen viel dünner waren als an der Durchbruchstelle.

Bei anderen Versuchen wurden lange, an einem Ende sorgfältig zugeschmolzene Glasröhren, von nur 0,03 cm. Wanddicke verwendet.

Diese Röhren waren beinahe vollständig mit Quecksilber gefüllt, welches als innere Belegung diente. Von aussen war die Röhre nur soweit mit Stanniol belegt, daß noch ein freier Zwischenraum von 20 cm. vom Belege bis zum offenen Rande der Röhre blieb.

Es wurden in erster Linie Versuche mit diesen Röhren in freier Luft vorgenommen, wobei sich am oberen Rande des äußeren Beleges ein leuchtender Saum zeigte, der besonders im Dunkeln deutlich zu sehen war.

Je höher die angewandte Wechselstromspannung gesteigert wurde, um so breiter erschien der leuchtende Saum.

Die Spannung von 24,000 Volt, welche viele dieser

so dünnwandigen Röhren aushielten, stand scheinbar in Widerspruch mit den Resultaten, welche mit den in Öl getauchten Scheiben erhalten wurden, die bei einer Dicke von 2 mm. schon bei niedrigeren Spannungen durchbrochen wurden.

Bei näherer Betrachtung läßt sich diese Erscheinung auf folgende Weise erklären :

Im ersten Falle, bei den in Öl getauchten Glasscheiben, ist durch die gute Isolation mit Öl der Rand des Beleges scharf begrenzt. An diesem scharf begrenzten Rande findet eine Verdichtung der Kraftlinien statt, was theoretisch leicht zu begründen ist, und dadurch wird der Durchbruch verursacht.

Im andern Falle, bei der in freier Luft befindlichen Röhre, schließt sich an die Stanniolbelegung eine feine Feuchtigkeitsschicht an, welche den unbelegten Teil der Glasröhre bedeckt. Weil nun die elektrische Ladung auch auf dieses Feuchtigkeitsschicht sich ausbreitet, wird eine Verdichtung der Kraftlinien am Rande des Stanniolbeleges vermieden.

Auf der Feuchtigkeitsschicht aber findet infolge ihres großen Ohmschen Widerstandes ein bedeutender Spannungsabfall statt, also auch eine Abnahme der Kraftliniendichte. Und dieser allmälige Übergang erklärt, warum diese Röhren in der Luft eine so unerwartet hohe Spannung aushielten.

Um den Einfluß dieser Erscheinung auf die Durchbruchsspannungen zu vermeiden, wurden dann dieselben Röhren, in Isolationsöl untergetaucht, der Probe unterworfen.

Diese Proben ergaben dann auch wirklich, daß

schon bei 8000 Volt der Durchbruch stattfand und zwar stets am Rande der Belegung.

Um diesen Punkt klarzulegen, machte Herr Mościcki weitere Versuche mit Kondensatoren aus Glasröhren, die ungefähr die Form von Probierröhrchen hatten.

Als innere Belegung wurde wieder Quecksilber in die Röhren gefüllt. Unter dem Rand der äußeren Belegung, welche wieder Stanniol war, waren nun sehr dünne Glimmerbänder stufenförmig so auf die Glasröhre gewickelt, daß ein allmäliger Übergang vom einfachen Glase bis zu dem mit drei- bis vierfachen Glimmerband verstärkten Glase stattfand; die dickste Stelle kam unter den Rand des Beleges und erstreckte sich darüber noch ein Stück weiter.

Der Rand des äußeren Beleges war vom offenen Ende der Röhre 6 cm. entfernt.

Einige dieser Röhrenkondensatoren waren ohne diese obengenannte Verstärkung mit Glimmerband ausgeführt, um die Wirkung dieser Abänderung genauer beobachten zu können. Alle Röhren waren bei den Versuchen in Öl untergetaucht.

Wie auffällig die Wirkung der Randverstärkung zutage trat, geht daraus hervor, daß Röhren von 0,03 cm. Wanddicke ohne Randverstärkung mit 8000 Volt durchbrochen wurden und zwar am Rande der Belege, während Röhren von gleicher Dicke des Glases aber mit der erwähnten Glimmerverstärkung sogar 17,000 Volt aushielten, obwohl der Durchbruch immer noch am Rand der Belegung durch Glas und Glimmer hindurch stattfand.

Eine Ausnahme davon trat nur ein, wenn das Öl infolge von geringen Verunreinigungen nicht mehr genügend isolierte.

Der Durchbruch erfolgte in diesem Falle durch das Glas am obern Rande der Glimmerverstärkung, da das Öl etwas leitend war und das Dielektrikum an dieser Stelle bedeutend schwächer war, als am Rand des Stanniolbeleges.

Bei Versuchen andere Materialien als Glimmer zur Verstärkung der Glasröhren zu verwenden, stellte es sich heraus, daß das Material, welches als Verstärkung dient, nicht viel geringere Dielektrizitätskonstante haben darf, als das Glas selbst, da sich sonst ein zu scharfer Übergang bildet und die Randwirkungen am Anfang der Verstärkung unter dem Belege zur Geltung kommen, wo in diesem Falle der Durchbruch stattfindet.

Diese von Herrn Mościcki vorgenommenen Versuche zeigten klar genug, daß die Dielektrika am Rande der Belege eine viel größere Beanspruchung auszuhalten haben, als im Innern von parallel belegten Flächen.

Es blieb aber noch übrig zu untersuchen, um wie viel die Verstärkung am Rande erhöht werden müsse, um einen Durchbruch im Innern von belegten Flächen zu erreichen, ohne Einfluß von seiten der Randwirkungen. Um einen möglichst feinen Übergang und genügende Randverstärkung zu erzielen, wurden für die Versuche Glasröhren gewählt, welche auf dem größten Teil ihrer Länge sehr dünnwandig waren, deren offenes Ende jedoch als dickwandige etwas engere Röhre ausgebildet war.

Der Rand der Belege kam hier auf den dickwandigen Teil der Röhren.

Die früher schon gewonnene Überzeugung wurde hier glänzend bestätigt, denn es bedurfte einer Wanddicke des Röhrenteiles unter dem Rand des Beleges, welches ein Vielfaches der dünnen Röhrenwände in der Mitte des Beleges betrug, um bei den Proben die Durchbruchstelle vom Rande fernzuhalten und in die Mitte des Beleges zu verlegen.

Waren durch diese äußerst wichtigen Resultate einerseits neue Grundprinzipien für den rationellen Aufbau von Kondensatoren gegeben, so war andererseits für die Wissenschaft mehr als eine interessante Frage zur Erforschung vorgelegt.

Herr Mościcki, seinerseits mit andern wissenschaftlichen und technischen Arbeiten überhäuft, hatte die Güte mir die genauere Untersuchung einer dieser neuen Fragen zu übertragen, deren Grundgedanken die folgenden Zeilen erläutern.

Die Versuche hatten unzweideutig gezeigt, daß die zum Durchbruch nötige Spannung für eine bestimmte Dicke eines und desselben Dielektrikums sehr verschieden ist, je nachdem der Durchbruch am Rande eines Beleges oder im Innern einer belegten Fläche stattfindet.

In welcher Weise der Durchbruch am Rande des Beleges oder im Innern von belegten Flächen bei verschiedenen Dielektrika und verschiedenen Dicken derselben von der angewandten Spannung abhängt und eventuell den nähern Zusammenhang der beiden verschiedenen Arten der Beanspruchung der Dielek-

trika zu erklären, das ist das Ziel der Arbeit, deren Resultate ich in dieser Abhandlung niedergelegt habe.

Zugleich werde ich durch eine Reihe von Versuchsergebnissen zeigen, in welcher Weise bei Verwendung von Wechselstrom, die Beanspruchung der Dielektrika von der Frequenz des Wechselstromes beeinflußt wird.

Versuchseinrichtung.

In erster Linie wurden Durchbruchsproben mit den verschiedenen Materialien angestellt, mit Wechselstrom von 50 Perioden per Sekunde.

Die Spannungen, welche ich dazu benötigte, lagen zwischen den Grenzen von 4000 bis 80,000 Volt. Zur Verfügung stand Wechselstrom von 160 Volt, dem Verteilungsnetze der hydroelektrischen Zentrale, in Hauterive (Freiburg, Schweiz) entnommen.

Um die Spannungen bis 8000 Volt zu erhalten, diente ein für industrielle Zwecke gebauter Transformator von 10 K. W. Die primäre Bewickelung dieses Transformators bestand aus zwei getrennten Teilen, jeder mit spezieller Stromabnahme und zwar jede für Spannungen bis 110 Volt.

Die sekundäre Hochspannungsbewickelung war ebenfalls in zwei Teile getrennt, von denen jeder Spannungen bis zu 4000 Volt abgab. Es konnten also mehrere Übersetzungsverhältnisse erreicht werden.

Für die Spannung bis 80,000 Volt wurde ein

in Öl getauchter Hochspannungstransformator von 3,5 K. W. der Firma Brown, Boverí und Co. in Baden (Schweiz), benützt, dessen Übersetzungsverhältnis 70 zu 50,000 Volt war. Obwohl dieser Transformator für Spannungen bis zu 50,000 Volt ausgeführt war, konnte ich ihn auch für die höheren Spannungen benutzen, da er vorher zu wiederholten Malen bis auf 80,000 Volt ausprobiert worden war.

Natürlich war ein sehr wichtiger Punkt der Versuchseinrichtung das Regulieren der Spannung, welches nicht nur in weiten Grenzen, sondern auch mit sehr kleinen Abstufungen stattfinden mußte. Dieses Ziel wurde auf das beste erreicht durch einen elektrolytischen Widerstand, welcher in einer Reihe mit einem Metallwiderstand in den primären Stromkreis eingeschaltet war.

Dieser elektrolytische Regulierwiderstand, welchen nebenstehende Skizze (Fig. 1) veranschaulicht, bestand in der Hauptsache aus einer Tonröhre von 120 cm. Höhe und 20 cm. Lichtweite, welche auf eine gußeiserne Grundplatte, wasserdicht aufgekittet war. Als Elektrolyt wurde eine Salzlösung eingefüllt.

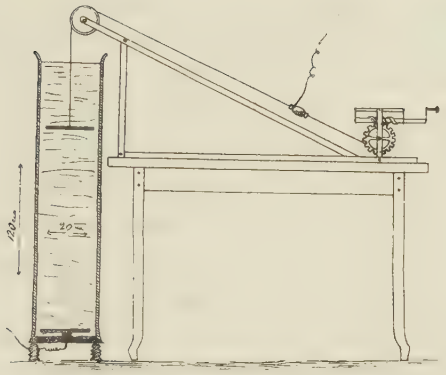

Fig. I.

Als eine Elektrode diente die gußeiserne Grundplatte, welche vom Fußboden durch gute Porzellanisolatoren isoliert wurde. Diese Grundplatte war mit der einen Klemme des Transformators verbunden.

Als zweite Elektrode diente ebenfalls eine runde gußeiserne Platte von 18 cm. Durchmesser.

Diese Platte war parallel zur Grundplatte und ihre Entfernung von derselben konnte in jedem beliebigen Maße vergrößert oder verkleinert werden, was durch folgende Vorrichtung erreicht wurde. Als leitende Verbindung dieser Platte mit der Stromquelle dient ein sehr biegsames Kupferkabel von passender Länge, an welchem die Platte aufgehängt war.

Dieses Kabel, welches über eine Porzellanrolle lief, die mitten über der Tonröhre an einem hölzernen Arme befestigt war, wurde an passender Stelle von einer Seidenschnur erfaßt, welche auf einer kleinen Rolle auf- oder abgewunden werden konnte. Das

Drehen dieser Rolle erfolgte vermittelst einer endlosen Schraube mit Handkurbel. Die endlose Schraube griff in ein Zahnrad ein, welches mit der Schnurrolle auf der gleichen Achse befestigt war. Auf diese Weise war es möglich, die kleinsten Abstandsänderungen der beiden Elektroden im Elektrolyt vorzunehmen, also den Widerstand nach Belieben zu vergrößern oder zu verkleinern. Eine ganze Kurbeldrehung der endlosen Schraube veränderte den Abstand der Elektroden um 2 mm.

Ein ebenfalls im primären Stromkreis eingeschalteter zweipoliger Unterbrecher war so handlich angebracht, daß der Beobachter augenblicklich den Strom unterbrechen konnte, selbst während der Ablesung von Meßinstrumenten.

Die Spannungsmessungen wurden im primären Stromkreis vorgenommen, denn einerseits hätten die großen Spannungsunterschiede, anderseits die beständige Lebensgefahr, welche mit direktem Ablesen der Hochspannungen verbunden wären, hätten die ohnehin zahlreichen Schwierigkeiten und Gefahren dieser Arbeit allzusehr vermehrt.

Als Spannungsmesser für die primären Spannungen unter 30 Volt benützte ich ein Milliamperemeter von Siemens und Halske. Die Teilung des Instrumentes war für 30 Milliamperen und je 5 Teilstriche zeigten ein Milliampere. Der innere Widerstand des Instrumentes (für Wechselstrom) war 1200 Ohm.

Die primären Spannungen über 30 Volt wurden mit einem Hitzdraht Voltmeter von « Hartmann

und Braun » gemessen, welches in 130 Teilen geteilt war und 3 Stromzuführung besaß :

die eine für 0— 65 Volt
die zweite für 0—130 Volt
die dritte für 0—260 Volt.

Die beiden Meßinstrumente hatte ich auf genau übereinstimmende Angaben geprüft.

Eine dicke Platte von Erdwachs, die, selbst ein ausgezeichnetes Isolationsmaterial, noch durch eine für Hochspannung isolierte Unterlage vom Erdboden getrennt war, diente zur Aufnahme der zum Durchbruch bestimmten Proben.

Der Durchbruchsversuch fand jedesmal in folgender Weise statt :

Nachdem die Proberöhre auf die isolierende Unterlage gebracht und in den Hochspannungsschließungskreis des Transformators eingeschaltet war, wurde im primären Stromkreis der Widerstand so groß gemacht, daß man sicher sein konnte, daß die resultierende Spannung das Dielektrikum nicht sofort durchbrechen werde; dann wurde der Strom geschlossen und die primäre Spannung sofort abgelesen. Sogleich wurde der Strom wieder unterbrochen und dann der elektrolytische Widerstand verkleinert, um die Spannung etwas zu steigern, dann erfolgte wieder Stromschluß und Ablesen der Spannung, Stromunterbrechung u. s. w. bis der Durchbruch stattfand. Je näher ich der Spannung kam, bei der ich den Durchbruch erwartete, um so geringer machte ich die Widerstandsänderung, um möglichst genau die kri-

tische Durchbruchsspannung zu erhalten. Der Strom blieb stets nur so lange Zeit geschlossen, als ich zur Ablesung der Spannung benötigte, um nicht die Festigkeit der Proberöhren durch Erwärmung zu beeinflussen. Als Durchbruchsspannung notierte ich stets die letzte abgelesene Spannung, da es im allgemeinen nicht möglich war beim Durchbruch selbst abzulesen.

Die Dicke des Dielektrikums wurde jeweilig nach dem Durchbruch gemessen mit einem Mikrometer, das für 1 Millimeter 100 Teilstriche besaß, welche je circa 0,2 cm. Abstand hatten. Da gekrümmte Flächen gemessen wurden, so war es nötig, daß eines der beiden Hörner, zwischen welche das zu messende Glasstück kam, spitzig geformt sei. Die nebenstehende Zeichnung zeigt, welche Form benützt wurde.

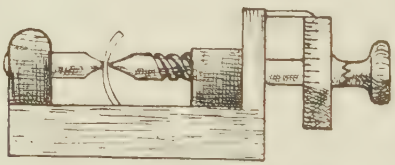

Fig. II.

Die Drehvorrichtung der Mikrometerschraube löste sich selbständig aus, sobald das Mikrometer auf die richtige Dicke eingestellt war. Es wurden stets die der Durchbruchstelle zunächst gelegenen Teile des Dielektrikums gemeßen, und die dünnste Stelle derselben notierte ich als Wandstärke der Durchbruchstelle.

Versuchsergebnisse.

Die erste Serie der Versuche galt der Bestimmung der Durchbruchsspannungen am Rande der Belege.

Der Probe unterworfen wurden zylindrische Röhren von Glas. Das eine Ende derselben war zugeschmolzen. Röhren von Ebonit wurden hergestellt durch teilweises Ausbohren von Ebonitstäben.

Die äußere Belegung dieser Röhren war durch chemisches Versilbern nach Böttger hergestellt und bedeckte ungefähr ein Drittel der Röhrenlänge. Das Innere der Röhren war beinahe vollständig mit Quecksilber gefüllt.

Nebenstehende Skizze (Fig. III) zeigt, wie die so vorbereiteten Röhren zu Versuchen verwendet wurden.

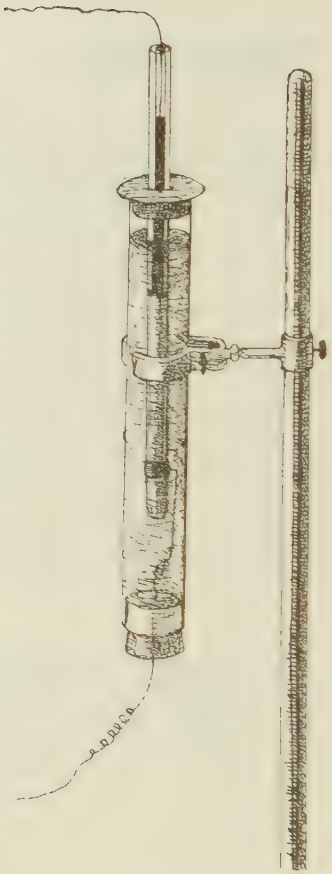

Fig. III.

Ein weiter Glaszylinder von ungefähr 30 cm. Länge, und von einem Ebonitstativ getragen, war unten durch einen Kautschukpfropfen verschlossen, durch welchen hindurch die Stromzuführung für die äußere Belegung der Proberöhre führte. Die

versilberte Röhre selbst wurde an einer Stelle mit Stanniolband umwickelt und von einem 2-3 cm. breiten Rand aus sehr dünnem Kupferblech fest umschlossen. Dieses letztere diente zur Verbindung mit der Stromzuführung, mit welcher das Kupferband in Kontakt gebracht wurde.

Der Glaszylinder war beinahe vollständig mit bestem Hochspannungsisolationsöl gefüllt und oben durch einen Ebonitdeckel verschlossen. Durch eine Öffnung in der Mitte des Ebonitdeckels war die Proberöhre hindurchgeführt und wurde durch den Ebonitdeckel getragen.

Zwei Drittel der Länge der Röhre, waren in das Öl im Zylinder untergetaucht.

In das offene Ende der Röhre, welches über den Ebonitdeckel hinausragte, wurde ein Zuleitungsdraht in das Quecksilber eingetaucht als Stromverbindung mit innerer Belegung der Röhre.

Es kommen drei Sorten von Glas und Ebonit zu dieser Reihe von Versuchen in Betracht :

1. Gewöhnliches böhmisches Geräteglas, Alkaliglas, wie es im Laboratorium und speziell zu Probierröhrchen verwendet wird.

2. Alkalifreies Glas von der Firma Schott und Genossen in Yena, Nr. 477 III.

3. Borsilikat-Thermometerglas von gleicher Firma, Nr. 59 III.

Die folgenden Tabellen geben die Resultate dieser Versuchsreihen in Zahlen an.

Die erste Kolonne enthält die Dicken des durchbrochenen Glases.

Die zweite Kolonne gibt den äußeren Durchmeßer der betreffenden Röhren an; denn obwohl orientierende Versuche, welche ich in dieser Hinsicht vorgenommen habe, keinen merklichen Einfluß zeigten, welchen die hier vorkommende Verschiedenheit der Röhrendurchmeßer auf die Durchschlagsspannung haben könnten, so hielt ich es doch für passend den jeweiligen Durchmeßer der Röhren auszugeben. Ich hätte gewünscht, stets Röhren von gleichem Durchmeßer für alle Wanddicken zu diesen Versuchen verwenden zu können, was mir aber das zur Verfügung stehende Material nicht erlaubte.

Die dritte Kolonne gibt die resultierende Durchbruchsspannung an, und die vierte Kolonne endlich die Quadrate der Durchbruchsspannung.

Gewöhnliches Alkaliglas.

Tabelle I.

δ	d	V	V^2
mm	mm		
0.20	14.7	6,400	4096.10^4
0.25	14.4	7,600	5776.10^4
0.30	15.2	8,750	7656.10^4
0.30	15.1	8,740	7638.10^4
0.40	11.2	10,250	1050.10^5
0.41	11.3	10,500	1102.10^5
0.41	11.4	10,450	1092.10^5
0.45	11.45	10,920	1192.10^5
0.45	11.45	10,930	1194.10^5
0.47	11.0	11,320	1281.10^5

Tabelle I (Fortsetzung).

δ	d	V	V^2
mm	mm		
0.50	24.5	11,650	1357.10^5
0.50	24.9	11,650	1357.10^5
0.50	17.7	11,720	1373.10^5
0.50	20.2	11,650	1357.10^5
0.51	10.8	12,000	1440.10^5
0.51	14.5	11,860	1406.10^5
0.51	15.5	12,000	1440.10^5
0.52	10.8	12,175	1482.10^5
0.53	15.3	12,170	1481.10^5
0.53	15.2	12,200	1488.10^5
0.53	17.5	12,100	1464.10^5
0.55	12.2	12,400	1537.10^5
0.55	14.8	12,360	1527.10^5
0.55	14.6	12,380	1532.10^5
0.55	13.6	12,300	1512.10^5
0.60	14.5	12,730	1623.10^5
0.60	14.7	12,780	1633.10^5
0.60	17.6	12,750	1625.10^5
0.60	15.2	12,800	1638.10^5
0.61	14.7	12,900	1664.10^5
0.61	14.5	12,850	1651.10^5
0.64	18.2	13,000	1690.10^5
0.65	16.8	13,300	1768.10^5
0.65	17.0	13,250	1755.10^5
0.65	16.5	13,280	1763.10^5
0.65	16.2	13,400	1795.10^5
0.67	16.8	13,600	1849.10^5

Tabelle I (Fortsetzung).

δ	d	V	V^2
mm	mm		
0.68	15.4	13,750	1890.10^5
0.68	15.3	13,680	1871.10^5
0.70	30.5	13,700	1876.10^5
0.70	24.3	13,750	1890.10^5
0.74	20.4	13,870	1923.10^5
0.75	20.2	14,150	2002.10^5
0.75	20.4	14,200	2016.10^5
0.80	8.5	14,640	2124.10^5
0.80	8.4	14,600	2131.10^5
0.80	8.4	14,650	2146.10^5
0.81	8.6	14,650	2146.10^5
0.81	8.8	14,700	2160.10^5
0.84	8.7	14,800	2190.10^5
0.84	7.7	14,750	2175.10^5
0.84	7.8	14,850	2205.10^5
0.85	10.3	14,900	2220.10^5
0.85	10.2	15,000	2250.10^5
0.85	10.3	14,950	2235.10^5
0.88	24.5	15,320	2347.10^5
0.90	7.8	15,460	2390.10^5
0.90	7.5	15,400	2371.10^5
0.91	7.9	15,460	2390.10^5
0.95	7.4	15,800	2496.10^5
0.95	7.4	15,800	2496.10^5
5.95	7.5	15,750	2480.10^5
0.96	7.5	15,860	2512.10^5
0.99	7.8	16,290	2653.10^5

Tabelle I (Fortsetzung).

δ	d	V	V^2
mm	mm		
0.99	7.8	16,200	2624.10^5
1.00	8.2	16,250	2640.10^5
1.00	8.3	16,250	2640.10^5
1.05	12.5	16,600	2755.10^5
1.05	12.6	16,600	2755.10^5
1.10	12.8	17,000	2890.10^5
1.10	12.7	17,100	2924.10^5
1.20	16.8	17,600	3097.10^5
1.20	16.5	17,600	3097.10^5
1.25	9.2	17,680	3125.10^5
1.26	9.3	17,700	3132.10^5
1.30	12.4	18,250	3330.10^5
1.33	12.4	18,300	3348.10^5
1.50	14.2	20,240	4096.10^5
1.50	14.8	20,400	4161.10^5
1.55	12.8	21,000	4410.10^5
1.55	18.2	20,980	4401.10^5
1.65	19.5	21,750	4730.10^5
1.72	14.4	22,300	4972.10^5
1.73	14.5	22,300	4972.10^5
1.75	14.5	22,450	5040.10^5
2.35	18.2	24,000	5760.60^5
2.50	18.2	27,000	7260.10^5
2.60	17.3	27,100	7344.10^5
2.70	17.5	27,150	7371.10^5

Alkalifreies Glas von Firma Schott und Genossen in Jena, Nr. 477^{III}.

Tabelle II.

δ	d	V
mm	mm	
0.20	10.2	6,950
0.20	10.2	7,000
0.23	10.5	7,900
0.24	10.4	8,400
0.25	10.4	8,500
0.30	12.4	9,750
0.35	12.2	10,900
0.35	12.4	10,950
0.35	12.5	10,900
0.36	14.0	11,000
0.37	12.8	11,200
0.40	8.2	12,000
0.40	8.2	12,100
0.40	8.3	11,900
0.40	8.2	12,000
0.45	9.4	12,750
0.45	9.5	12,800
0.50	6.2	13,400
0.50	6.3	13,480
0.55	8.2	13,900
0.57	8.0	14,000
0.57	8.2	14,120
0.60	9.5	14,400
0.60	9.6	14,420

Tabelle II (Fortsetzung).

δ	d	V
mm	mm	
0.62	8.9	14,480
0.63	9.9	14,600
0.65	10.0	14,850
0.65	9.8	14,900
0.70	10.3	15,250
0.70	15.4	15,250
0.75	9.4	15,560
0.75	9.4	15,600
0.77	9.5	15,750
0.80	7.8	15,950
0.80	7.7	15,980
0.85	15.2	16,250
0.85	14.8	16,300
0.90	9.6	16,650
0.90	9.6	16,680
0.90	10.0	16,700
0.95	8.4	17,000
0.95	8.4	17,000
0.97	8.3	17,150
1.00	9.05	17,380
1.00	9.5	17,400
1.10	7.8	18,000
1.10	7.8	17,950
1.15	7.9	18,300
1.20	12.4	18,650
1.20	12.4	18,650
1.24	12.6	18,750

Borsilicat-Thermometerglas, Nr. 59^{III}.

Tabelle III.

δ	d	V
mm	mm	
0.19	14.5	7,540
0.20	14.5	7,850
0.25	12 3	9,700
0.30	12.8	11,200
0.35	13.0	12,700
0.40	9.7	13,800
0.45	9.8	14,500
0.45	9.8	14,450
0.48	4.9	14,750
0.50	4.8	15,000
0.50	4.9	14,950
0.55	5.6	15,400
0.60	10.0	15,800
0.60	10.1	15,800
0.65	10.5	16,150
0.65	10.4	16,200
0.70	9.4	16,620
0.71	9.4	16,700
0.75	9.5	16,950
0.75	9.6	17,000
0.78	11.0	17,200
0.78	11.2	17,260
0.80	7.2	17,400
0.82	7.2	17,500

Tabelle III (Fortsetzung).

δ	d	V
mm	mm	
0.83	7.3	17,680
0.85	6.4	17,800
0.88	6.2	17,960
0.90	7.4	18,200
0.90	7.5	18,200
0.90	7.4	18,175
0.92	7.8	18,350
0.95	7.1	18,500
0.95	7.0	18,500
0.97	8.0	18,650
9.97	8.1	18,700
1.00	10.5	18,870
1.00	10.4	18,850
1.00	10.4	18,850
1.05	9.5	19,200
1.10	9.8	19,560
1.10	9.8	19,500
1.15	10.1	19,900
1.20	15.0	20,340
1.20	15.1	20,340

Ebonit.

Tabelle IV.

δ	d	V
mm	mm	
0.20	14.8	4,800
0.20	14.7	5,000
0.25	13.5	5,860
0.25	13.6	5,900
0.35	14.9	7,500
0.50	15.0	9,640
0.50	15.1	10,100
0.70	15.4	11,850
0.95	16.0	13,550
1.00	16.1	14,100
1.00	16.1	13,850
1.10	18.2	14,600

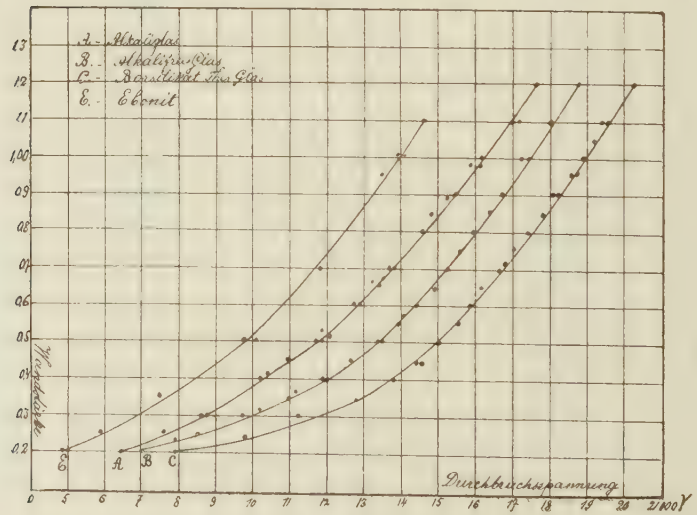

Fig. VI.

Die folgende Versuchsreihe galt der Bestimmung der Durchbruchsspannung in der Mitte von belegten Flächen. Zur Herstellung dieser Proberöhren benützte ich dickwandige Glasröhren. Nachdem diese Röhren an dem einen Ende sorgfältig zugeschmolzen waren, wurden sie an einer Stelle erwärmt und durch Aufblasen und Ziehen eine sphärische Erweiterung geformt, deren Wände im Vergleich zur Wanddicke der übrigen Röhren sehr dünn waren. Der Rand des Beleges, welcher wiederum durch Versilbern hergestellt wurde, kam hier auf den dickwandigen Röhrenteil, um einen Durchbruch durch die dünneren Wände der aufgeblasenen Erweiterung, also im Innern der belegten Fläche zu erzielen. Da für die höheren Spannungen die zur Verfügung stehenden Röhren nicht genügende Wanddicken hatten, um den Durchbruch vom Rande der Belege fernzuhalten, mußte ich eine größere Anzahl der Röhren noch durch eine Isolationsmasse [1] verstärken.

Die Ausführung dieser Verstärkung erforderte die größte Sorgfalt; der Übergang mußte sehr fein sein, damit die Verstärkung ihrem Zwecke entsprechen konnte. Und nur, weil schon eine im Verhältnis zur Dicke der Glasröhre äußerst dünne Schicht von Masse den Übergang bildete, durfte ich auf Erfolg der Verstärkung rechnen. Auf der Verstärkung mit Masse war die Belegung mit Stanniol hergestellt.

Die Stromzuleitung wurde durch ein Kupferband

[1] Die Isolationsmasse besteht aus Erdwachs, Kolophonium und Vaselin und zeichnet sich durch gutes Haften auf Glas aus.

wie bei den vorigen Versuchen ausgeführt und zwar auf dem dickwandigen Teil der Röhre.

Die so vorbereiteten Röhren wurden mit dem offenen Ende durch eine passende Öffnung in einer cirka 15 cm Breite und Länge Isolitplatte [1] geführt, so daß der Rand des äußeren Beleges gerade in die Öffnung der Platte zu stehen kam. Auf der Isolitplatte wurde das freie offene Ende der Glasröhre mit einem dicken Ring von Isolationsmasse fest umgossen, um jeden Potentialausgleich zwischen der inneren und äußeren Belegung auf diesem Wege zu vermindern.

Nebenstehende Zeichnungen erläutern die besagte Anordnung:

(Fig. V) ist eine Proberöhre ohne Verstärkung durch Masse;

(Fig. VI) ist eine Proberöhre mit Verstärkung durch Masse.

[1] Patentiertes Isolationsmaterial der Cie de l'Industrie électrique de Genève.

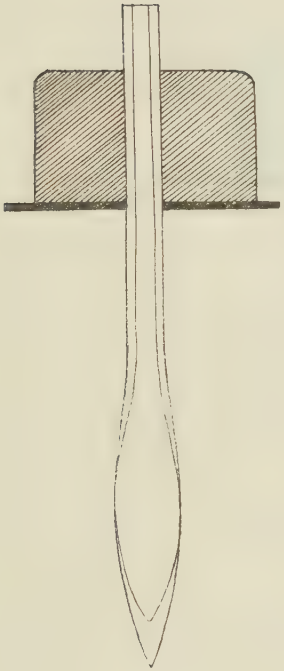

Fig. V.

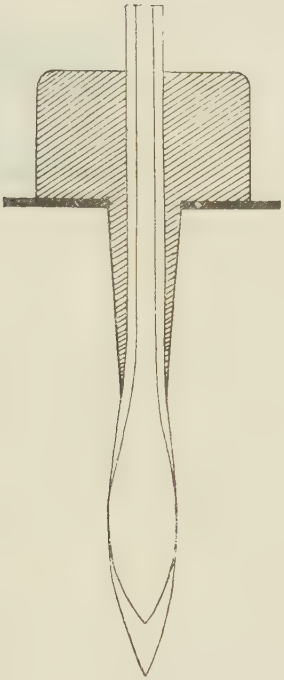

Fig. VI.

Die Ebonitröhren wurden durch teilweises Ausbohren von Ebonitstäben dickwandig hergestellt.

Dann wurde an einer Stelle von außen rundherum eine Vertiefung ausgedreht, wodurch die Wände an dieser Stelle dünn wurden.

Beistehende Zeichnung (Fig. VII) zeigt eine zur Probe vorbereitete Röhre von Ebonit.

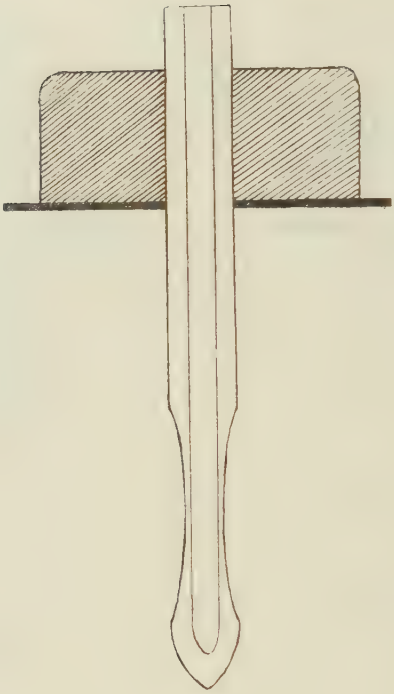

Fig. VII.

Die Röhren von Ebonit wurden bei den Versuchen in Quecksilber eingetaucht, welches so die äußere Belegung bildete. Als innere Belegung wurde Quecksilber in die Röhren gefüllt. Bei den Proben wurden die Glasröhren in der Luft gehalten, also nicht mehr unter Öl wie bei der früheren Versuchsreihe.

Anfänglich stellte ich Versuche an mit Proberöhren, welche durch Zusammenschweißen einer dünnwandigen und einer dickwandigen Glasröhre hergestellt waren. Der dickwandige Teil der Röhre

trug in diesem Falle den Rand der Belegung. Die hierbei erhaltenen Resultate waren aber gar nicht übereinstimmend, denn die dem Auge als schwache Linien erscheinenden kleinen Risse, wie sie in gezogenen Röhren stets vorkommen, beeinflußten die Resultate der Durchbruchspannungen in bedeutendem Grade. Dadurch, daß die Röhren aus dickwandigen Röhren geblasen wurden, wurden diese Risse vollständig vermieden und die Resultate waren dann auch dementsprechend regelmäßiger.

Die Zahlen der folgenden Tabellen geben die Resultate dieser Versuchsreihe wieder, zu welcher die gleichen Arten von Dielektrika benützt wurden, wie bei der ersten Versuchsanordnung.

Die erste Kolonne der folgenden Tabellen enthält die Dicke des Dielektrikums an der Durchbruchsstelle.

Die zweite Kolonne enthält die Dicke des Dielektrikums unter dem Rande der Belegung. In einer Anzahl von Versuchen ist hier Glas und Isolationsmasse zusammengefügt, wie es auch die Tabellen näher angeben.

Die dritte Kolonne gibt die resultierenden Durchbruchspannungen an, und die vierte Kolonne enthält das entsprechende Potentialgefälle.

Mitte der Belegung.

Tabelle V.

δ	δ_1	V	$\frac{V}{cm}$
mm	mm		
0.05	2.00	6,850	1370.10^3
0.05	2.00	7,100	1420.10^3
0.08	2.10	11,050	1381.10^3
0.08	2.15	11,850	1480.10^3
0.09	2.10	13,200	1467.10^3
0.09	2.15	13,800	1481.10^3
0.10	2.13	13,670	1367.10^3
0.10	2.12	14,000	1400.10^3
0.10	2.16	14,450	1445.10^3
0.12	2.13	16,500	1375.10^3
0.13	2.30	18,000	1384.10^3
0.13	2.46	18,560	1427.10^3
0.15	2.46	20,130	1342.10^3
0.15	2.45	20,300	1355.10^3
0.16	2.48	21,000	1312.10^3
0.16	2.30	20,470	1279.10^3
0.18	2.46	26,600	1477.10^3
0.18	2.47	24,700	1372.10^3
0.20	3.00	27,460	1373.10^3
0.20	2.94	27,700	1385.10^3
0.20	2.98	27,500	1375.10^3
0.25	3.4 + 4 m	33,600	1344.10^3
0.25	3.4 + 4 m	32,745	1309.10^3
0.30	3.2 + 3 m	41,055	1368.10^3

Tabelle V (Fortsetzung).

δ	δ_1	V	$\frac{V}{cm}$
mm	mm		
0.30	3.3 + 3 m	40,340	1343.10^3
0.35	3.3 + 4 m	46,800	1331.10^3
0.35	3.5 + 4 m	46,053	1315.10^3
0.40	3.4 + 4 m	54,300	1356.10^3
0.40	3.2 + 4 m	55,000	1374.10^3
0.40	3.3 + 4 m	53,500	1338.10^3
0.43	3.5 + 4 m	58,190	1353.10^3
0.45	3.5 + 4 m	60,960	1348.10^3
0.45	3.5 + 4 m	61,404	1364.10^3
0.50	3.4 + 5 m	67,116	1342.10^3
0.55	3.5 + 5 m	74,960	1363.10^3

Ebonit.

Tabelle VI.

δ	δ_1	V	$\frac{V}{cm}$
mm	mm		
0.10	1.80	7.864	7864.10^2 *
0.20	1.95	18,207	9103.10^2
0.20	1.94	18,564	9282.10^2
0.25	2.00	24,990	9990.10^2

* Bei Bearbeitung des Ebonit war es unmöglich geringe Beschädigungen der Oberfläche zu vermeiden, was besonders bei den Resultaten der dünnwandigen Röhren sich durch geringeres Potentialgefälle bemerkbar macht.

Tabelle VI (Fortsetzung).

δ	δ_1	V	$\frac{V}{cm}$
mm	mm		
0.25	2.10	25,022	1000.10^3
0.30	2.20	33,915	1130.10^3
0.30	2.60	32,986	1099.10^3
0.30	2.50	32,130	1071.10^3
0.35	3.10	36,414	1040.10^3
0.35	3.50	37,128	1060.10^3
0.41	3.65	44,625	1088.10^3

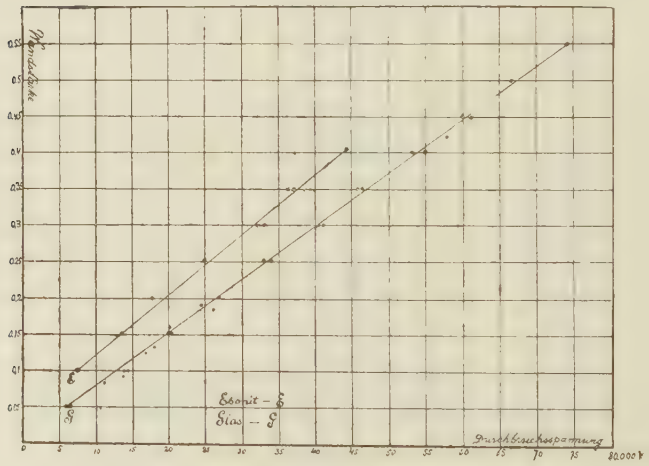

Fig. VIII.

Versuche mit hoher Frequenz.

Nachdem zwei Reihen Versuche mit Wechselstrom von 50 Perioden per Sekunde sehr interessante Resultate ergaben, fand ich, daß einige Versuche mit Wechselstrom von höherer Frequenz unter Umständen viel zur Erklärung der vorgelegten Frage beitragen könnten.

Es stand mir zur Ausführung der Proben für diesen Zweck ein Wechselstromgenerator zur Verfügung, der von Herrn Ingenieur Thury in Genf auf Veranlassung von Herrn Prof. von Kowalski konstruiert worden war.

Der Generator liefert bei normaler Umdrehungszahl (3000 Touren per Minute) Wechselstrom von 10,000 Perioden per Sekunde und ist mit einem einpoligen Gleichstrommotor (System Thury) direkt gekuppelt. Im Generator sind Induktor und Anker feststehend.

Der rotierende Teil des Generators hat ungefähr die Form eines von innen verzähnten Zahnrades mit 200 Zähnen, so daß eine Umdrehung 200 Perioden ergibt, und bildet einen Teil des Schließungskreises der magnetischen Kraftlinien.

Der Widerstand des magnetischen Schließungskreises wurde also vermindert oder vermehrt, je nachdem die Zähne oder die Lücken des Rotors den Nuten des Ankers gegenüberstanden. Die Erregung des Induktors erfolgte durch Gleichstrom, welcher

der gleichen Leitung wie der Betriebsstrom des Motors entnommen wurde.

Der Generator war demnach eine Gleichpolmaschine. Der gelieferte Strom ändert also seine Richtung nicht, wohl aber seine Spannungswerte.

Die Ankerbewickelung war in zwei Gruppen mit separaten Abnahmen geschaltet. Jede Gruppe liefert normal 100 Volt und 8 Ampere. Es lassen sich also folgende Schaltungen herstellen :

Beide Gruppen in Reihe
— 200 V. und 8 Ampere.
Beide Gruppen in parallel
— 100 V. und 16 Am.

Der Erregerstrom ist normal 110 V. und 2 Ampere Maximum.

Die Spannungen, welche die Maschine lieferte, war aber nicht genügend für die Durchbruchsproben, ich mußte also einen Transformator benützen.

Ich änderte an einem Dreiphasentransformator « Helvetia » von 2 K. W. der Firma Alioth, Münchenstein = Basel, der mir zur Verfügung stand, die Schaltung, um ihn also für Monophasenstrom benützen zu können ; ich konnte folgende Übersetzungsverhältnisse herstellen :

180 : 1200
180 : 3600
180 : 10,800.

Die Periodenzahl wurde jedesmal aus der Umdrehungszahl des Generators berechnet. Die Umdreh-

ungszahl selbst wurde mit einem Tachometer gemeßen und durch den Motorstrom und teilweise auch durch den Erregerstrom des Induktors des Generators reguliert, wozu Metallwiderstände dienten.

Die Spannung wurde im primären Stromkreis des Transformators gemessen und zwar mit dem gleichen Hitzdrahtvoltmeter von Hartmann und Braun, welches bei den Versuchen mit gewöhnlicher Frequenz 50 P. per. s. benützt worden war. Reguliert wurde die Spannung ebenfalls im primären Stromkreis durch Kurbelrheostaten von Dr. Paul Meyer in Berlin (für 7 Amp. 8 Ohm).

Die Versuche galten der Bestimmung der Durchbruchsspannung von Glasröhren am Rande der Belege und die Proberöhren waren in ähnlicher Weise, wie bei den korrespondierenden Versuchen mit gewöhnlicher Frequenz im Hochspannungsschließungskreis des Transformators aufgestellt.

Nachdem bei den Versuchen der Generator auf die gewünschte Umdrehungszahl gebracht war, wurde sie durch Regulieren vom Motorstrom konstant erhalten und mit dem Tachometer kontrolliert. Die Regulierwiderstände im primären Stromkreis waren anfänglich sämtliche eingeschaltet, der Stromkreis wurde geschlossen, Spannung abgelesen, Umdrehungszahl kontrolliert und der Strom wieder unterbrochen. Nachdem der Widerstand etwas verkleinert worden war, begann die Reihenfolge dieser Operationen von neuem, bis ein Durchbruch erfolgte. Dadurch, daß gleichzeitig mit der Spannung auch noch die Umdrehungszahl der Maschine kontrolliert und reguliert

werden mußte, waren die Versuche sehr umständlich gemacht.

Durch die unten folgenden Resultate auf die große Durchschlagskraft der Wechselströme hoher Frequenz aufmerksam gemacht, unterbrach ich weitere Proben, weil ich Beschädigungen des Transformators befürchtete, denn der Transformator war nur für eine Frequenz von 50 P. per. Sek. gebaut.

Obwohl die Ergebnisse dieser Versuchsreihe kein vollständiges Bild von der Wirkung hoher Frequenz geben, so sind sie doch interessant genug, um in dieser Arbeit einen Platz zu finden.

Versuche mit hoher Frequenz.

I. Versuch :
- Wandstärke = 0,20 mm
- Durchbruchsp. = 2520 Volt
- Periodenzahl = 8000

II. Versuch :
- Wandstärke = 0,53 mm
- Durchbruchsp. = 3600 Volt
- Periodenzahl = 9000

III. Versuch :
- Wandstärke = 0,55 mm
- Durchbruchsp. = 4800 Volt
- Periodenzahl = 8600

IV. Versuch :
- Wandstärke = 0,67 mm
- Durchbruchsp. = 5520 Volt
- Periodenzahl = 8600

Tabelle VII.

Dicke des Glases	Durchbruchsspannung	
	V	V
δ	Für hohe Frequenz 8000 bis 9000 Per.	Für gewöhnl. Freq. 50 Per. p. sec.
mm		
0,20	2520	6400
0.53	3600	12150
0.55	4800	12380
0.67	5520	13600

Nachdem hier die Zahlen der größeren Versuchsreihen aufgeführt sind, möchte ich an dieser Stelle noch einige einzelne ausgeführte Experimente erwähnen.

a) Eine Proberöhre genau ebenso vorbereitet, wie die in Fig. 5 dargestellte, war, nachdem die äußere Belegung sehr gut durch Versilbern hergestellt war, mit einer feinen Ritze im Belege versehen. Diese Röhre wurde dann durch Eintauchen in geschmolzene Isolationsmasse mit einem isolierenden Überzug bedeckt und dann der Durchbruchsprobe unterworfen. Der Durchbruch erfolgte bei einer Spannung von 8743 Volt P. 50 p. Sek. und zwar auf der der Belegung beigebrachten Ritze, wo das Glas eine Dicke von 0,3 mm hatte.

b) Ein zweites gleiches Rohr doppelt versilbert und mit gleichem Überzug von Isolationsmasse aber ohne Ritze in der Belegung war bei derselben Durch-

schlagsprobe bei einer Spannung von 25,270 Volt in der Mitte des Beleges durchbrochen bei einer Glasdicke von 0,175 mm.

c) Auf eine andere Proberöhre ebenfalls wie Fig. 5, welche jedoch nicht versilbert war, wurde ein Tropfen Isoliermasse in der Mitte der äußeren Oberfläche der sphärischen Erweiterung aufgegossen. Bei der Probe war diese Röhre in einen Elektrolyten eingetaucht, welcher so die äußere Belegung bildete.

Eine Spannung von 7000 Volt durchbrach die Röhre am Rande des aufgetropften Fleckes, wo das Glas 0,25 mm dick war.

Besprechung der Versuchsergebnisse.

Bevor ich zur näheren Besprechung der Resultate übergehe, stelle ich hier kurz noch einmal die Hauptpunkte der Versuchsergebnisse zusammen.

1. Das Experiment beweist, daß es zwei unter sich völlig verschiedene Arten von Durchbruch gibt: Durchbruch am Rande einer Belegung und Durchbruch im Innern von belegten Flächen.

Es ist die Möglichkeit gegeben, diese beiden Arten von Durchbruch getrennt und unabhängig von einander zu studieren.

2. Es ist ferner experimentell für Glas und Ebonit bewiesen, daß der Durchbruch am Rand der Belegung bei viel niedrigerer Spannung stattfindet als bei gleicher Dicke des Dielektrikums im Innern der belegten Flächen, sofern nicht begleitende Umstände,

wie z. B. Oberflächenleitung des Dielektrikums, die Belegung über den beabsichtigten Rand desselben erweitern. Einen solchen Fall haben wir in dem Experimente mit einer Proberöhre in freier Luft, wie solches in der Einleitung erwähnt ist.

Ein Vergleich von Tabelle I mit Tab. V für Glas und Tab. IV mit Tab. VI für Ebonit, zeigt uns die großen Unterschiede der beiden Arten des Durchbruchs, wo zum Beispiel :

Glas	0,5 mm	dick	am Rande	mit 11,700 V.	durchbr.
»	0,5 »	»	in der Mitte	» 67,100 V.	»
Ebonit	0,5 »	»	am Rande	» 9640 V.	»
»	0,41 »	»	in der Mitte	» 44,600 V.	»

3. Aus den Daten der Durchbruchsresultate im Innern der Belegung bei einer Sorte Glas Tab. V und Ebonit Tab. VI erkennen wir die Proportionalität zwischen Dicke des Dielektrikums und Durchbruchspannung (Fig. VIII).

4. Bei Durchbruch am Rande bei verschiedenen Dicken des Dielektrikums, wächst die Dicke viel schneller als die zum Durchbruch derselben nötige Spannung (Fig. IV).

Nehmen wir die Daten der Versuche in Tabelle I und setzen wir in graphischer Darstellung Fig. IX statt einfacher Spannung das Quadrat derselben, so sehen wir, daß Proportionalität zwischen der Dicke des Dielektrikums und dem Quadrate der betreffenden Durchbruchspannung (4. Kolonne der Tabelle I) besteht.

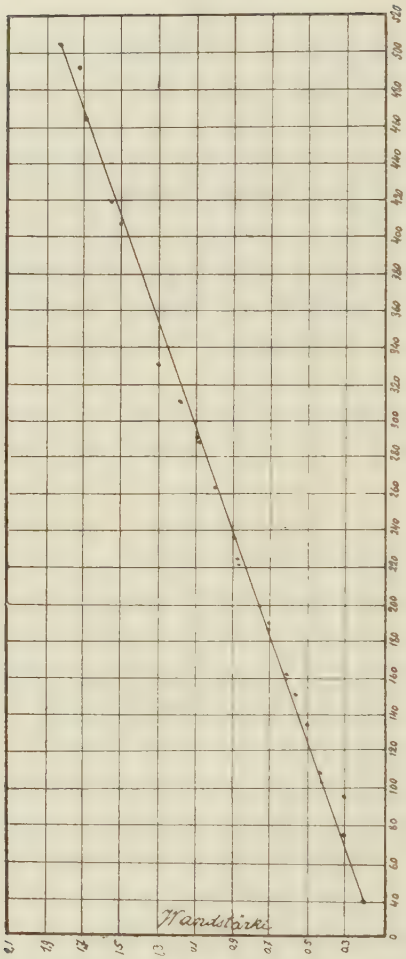

Fig. IX.

5. Die Versuche mit höherer Frequenz von 8000 bis 9000 Per. per Sek. zeigten beim Vergleich mit den Resultaten der Tabelle I (50 Per. per Sek.), welche die gleiche Glassorte und ebenfalls den Durchbruch

am Rande betreffen, daß die zum Durchbruch nötige Spannung bei hoher Frequenz bedeutend niedriger ist (Tabelle VIII).

Die in Nr. 1 und Nr. 2 kurz zusammengefaßten Versuchsergebnisse kann man dahin erklären (unter Benutzung einer bekannten Vorstellungsmethode), daß eine größere Kraftliniendichte am Rand des Beleges den Durchbruch erleichtert.

Die am Schlusse der Versuchsdaten angeführten Einzelexperimente *a*) und *c*) lassen sich ebenfalls zurückführen auf die Wirkung einer scharfen Kante der Belegungsfläche.

Anderseits ist durch das Experiment gezeigt worden, dass wirklich eine Verdickung des Dielektrikum möglich ist, ohne die Gefahr eines Durchbruches am Anfang der Verstärkung wesentlich zu vergrössern, wenn nur die Verdickung so ausgeführt ist, dass jede Bildung einer scharfen Kante der Belegung vermieden wird, was durch möglichst feinen Übergang von dem zu Grunde liegenden Dielektrikum auf das zur Verstärkung aufgelegte Dielektrikum erreicht wird.

Der Feinheitsgrad eines solchen Überganges ist bedingt durch die Dicke des zu Grunde liegenden Dielektrikums an dieser Stelle selbst und durch das Verhältnis der Dielektrizitätskonstante des Dielektrikum, welches verstärkt werden soll, zu den des zur Verstärkung benützten, d. h. je dicker das zu Grunde liegende Dielektrikum an dieser Stelle ist und je kleiner das genannte Verhältnis der Dielektrizitätskonstanten, ein desto geringerer Feinheitsgrad ist nötig, um den oben genannten Bedingungen zu genügen.

Diese Erwägungen, welche theoretisch keinen Widerspruch finden, werden durch Erfahrung bei verschiedenen Versuchen bestätigt, z. B. ist in der Einleitung ein Fall erwähnt, wo Glasröhren von 0,3 mm Wanddicke mit stufenweise aufgewickeltem Glimmverband verstärkt wurden, was bei gleichen Röhren, mit einer Isolationsmasse von viel niedrigerer Dielektrizitätskonstante nicht gelang. Ein anderes Beispiel haben wir in der Ausführung unserer Versuche, wo das Dielektrikum sehr hohen Spannungen unterworfen war, so daß über 3 mm dicke Gasröhren nicht genügende Verstärkung gegen Randdurchbruch bildeten, wo dann aber die oben genannte Isolationsmasse verwendet werden konnte, um die Verstärkung zu ergänzen, wie Fig. VI zeigt.

Nach diesen Betrachtungen erklären sich auch die Versuche von A. v. Waltenhofen [1], Mach und Dubrawa [2], welche zeigten, daß Platten von Dielektrika leichter durchbohrt werden, wenn auf selbe ein Ring aus einer Isolationsmasse aufgetropft wird und daß der Durchbruch stets am innern Rande des aufgetropften Walles stattfinde, obwohl die spitzen Elektroden sich im Zentrum befinden.

Wenn wir bedenken, daß die Oberflächenleitung der Dielektrika in Luft schon eine Belegung bildet, welche eben wie jede andere Belegung am Rande eines solchen aufgetropften Walles scharf abbiegt, wodurch

[1] A. v. Waltenhofen, Dinglers polytechn. Journ. 179, p. 435. 1866.

[2] E. Mach und S. Daubrava, Sitzungsber. d. K. Akad. d. Wissensch. zu Wien II, p. 729. 1878. Wied. Ann. 8, p. 462. 1879.

eine Art Rand oder Kante des Beleges entsteht, so finden wir die Erklärung hiervon schon oben erwähnt.

Die Experimente von Kißling und Walter[1] sind nur eine modifizierte Form dieser Versuche, denn der von einer Nadel durchgestochene Tropfen bildet eben auch einen Ring um die nadelgroße Öffnung.

Wenn andere Beobachter daraus das feste Dielektrika in Berührung mit Isolationsölen leichter durchgeschlagen werden, schließen, daß diese Berührung mit Ölen die Eigenschaften der festen Dielektrika verschlechtere, so müssen wir diese Tatsache vielmehr dahin erklären, daß durch Isolationsöl auch scharfe Grenzen der leitenden Flächen geschaffen werden, welche dann den Durchbruch in besagter Weise erleichtern.

Die in N. 3 ausgesprochene Tatsache zeigt uns die Möglichkeit den Festigkeitskoeffizienten eines Dielektrikums in wohl definierter Weise zu bestimmen, unabhängig von der Dicke derselben.

Der Ausdruck « wohl definiert » hat seine volle Begründung, denn wir haben den Durchbruch des Dielektrikums im gleichmäßigen elektrischen Felde, wo wir uns die Kraftlinien parallel vorstellen können, es sind also nur die Frequenz des Ladestromes und die Form der Spannungskurve, welche die Resultate bedingen.

Aus Tabelle V Kolonne 4 für gewöhnliches Glas ersehen wir, daß der Durchbruch für diese Glassorte

[1] Annalen d. Physik. Band II, p. 570. 1903.

bei Wechselstrom von 50 per. Sek. und einer Form der Welle, die wir annähernd als Sinusform betrachten dürfen, bei einem Potentialgefälle von annähernd

$$130.10^4 \frac{V}{cm.}$$

stattfindet.

Den Grund der in N. 4 erwähnten Erscheinung, daß nämlich die Dicke des Dielektrikum schneller wächst als die zum Durchbruch nötige Spannung am Rand des Beleges, können wir uns in folgender Weise erklären:

Da wir am Rande des Beleges nicht mehr ein gleichmäßiges elektrisches Feld haben, müssen wir uns, die nicht mehr parallelen Kraftlinien als abgebogen vorstellen, und demzufolge verlaufen auch die Niveauflächen des Potentialgefälles nicht mehr parallel zu den Belegungsflächen, sondern werden vielmehr zu der scharfen Kante hin, welche der Rand des Beleges bildet, zusammengedrängt.

Während wir im gleichmäßigen Felde im Innern des Beleges, wenn wir Spannung und Dicke des Dielektrikums proportional vergrößern, immer noch gleiche Zellengröße (gebildet durch Niveauflächen und Kraftlinien) für gleiche Energiemengen haben, so ist das nicht mehr der Fall am Rande des Beleges, wo die Niveauflächen noch mehr gegen die Kante des Beleges hin zusammengedrängt werden, und deshalb, wächst das Potentialgefälle in den der Kante des Beleges zunächst gelegenen Teilen des Dielektrikums.

Und endlich aus N. 5 ersehen wir, daß der Durch-

bruch nicht nur durch die Größe des Potentialgefälles bedingt ist, sondern auch durch die Geschwindigkeit, mit welcher die dielektrische Verschiebung stattfindet.

Es ist mir eine angenehme Pflicht an dieser Stelle Herrn J. Mościcki meinen tiefgefühlten Dank abzustatten; er hatte die Güte mich in diese Arbeit einzuführen und sie zu leiten.

Diese Arbeit wurde im Physikalischen Institut der Universität Freiburg i. d. Schweiz ausgeführt.

Ich erlaube mir meinem hochverehrten Lehrer Herrn Prof. J. v. Kowalski für sein gütiges Entgegenkommen, welches er mir während meinen Studien stets zu teil werden ließ, auch an dieser Stelle meinen verbindlichsten Dank auszusprechen.

CURRICULUM VITAE.

Ich, Konrad Kasperowicz, wurde in Brezgi (Littauen) am 2. Januar 1876 als Sohn des Gutbesitzers Sigmund Kasperowicz und seiner Gattin Johanna, geb. Zaremba, geboren. Das Realgymnasium besuchte ich in Wilno und bezog nach Absolvierung desselben die Bergakademíe zu St. Petersburg. Sodann studierte ich in Bern und seit 1900 in Freiburg (Schweiz), wo ich mich dem Studium der Physik und verwandter Wissenschaften widmete. Ich besuchte die Vorlesungen und arbeitete in den Laboratorien bei den folgenden Herren Professoren: Kowalski, Bistrzycki, de Girard, Thomas-Mamert (†), v. Kostanecki, Stein und Gockel.

Es sei mir erlaubt allen diesen meinen verehrten Lehrern auch an dieser Stelle meinen herzlichsten Dank abzustatten.

Freiburg (Schweiz). — St.-Paulus-Druckerei.